

УДК 537.533

## СТРУКТУРА ПЛЕНОК СИЛИЦИДОВ $MeSi$ ( $Me$ : Li, Rb, K и Cs) ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И ДИФРАКЦИИ МЕДЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2020 г. М. Т. Нормурадов<sup>b</sup>, А. С. Рысбаев<sup>a, \*</sup>, Ж. Б. Хужаниёзов<sup>a</sup>, Д. А. Нормурадов<sup>b, \*\*</sup>

<sup>a</sup>Ташкентский государственный технический университет им. И.А. Каримова,  
Ташкент, 100095 Узбекистан

<sup>b</sup>Каршинский государственный университет,  
Карши, 180103 Узбекистан

\*e-mail: rysbaev@mail.ru

\*\*e-mail: normurodovd1989@mail.ru

Поступила в редакцию 14.01.2020 г.

После доработки 25.02.2020 г.

Принята к публикации 28.02.2020 г.

Методами электронной спектроскопии, растровой электронной микроскопии и дифракции медленных электронов исследован процесс формирования тонких наноразмерных пленок силицидов металлов  $MeSi$  ( $Me$ : Li, Rb, K и Cs). В результате имплантации большой дозы ( $10^{17}$  см<sup>-2</sup>) низкоэнергетических (5 кэВ) ионов Li, Rb, K и Cs в монокристаллы Si(111) и Si(100) и кратковременного термического отжига в приповерхностной области кремния созданы монокристаллические силицидные пленки LiSi, RbSi, CsSi, KSi. Определены оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для формирования тонких монокристаллических пленок силицидов металлов. Показано, что толщина силицидных пленок растет с увеличением энергии имплантируемых ионов и при фиксированной энергии пропорциональна квадратному корню из дозы ионов.

**Ключевые слова:** монокристаллы кремния, имплантация больших доз низкоэнергетических ионов, концентрационные профили распределения атомов, термический отжиг, образование пленок щелочных металлов, структура и состав наноразмерных пленок.

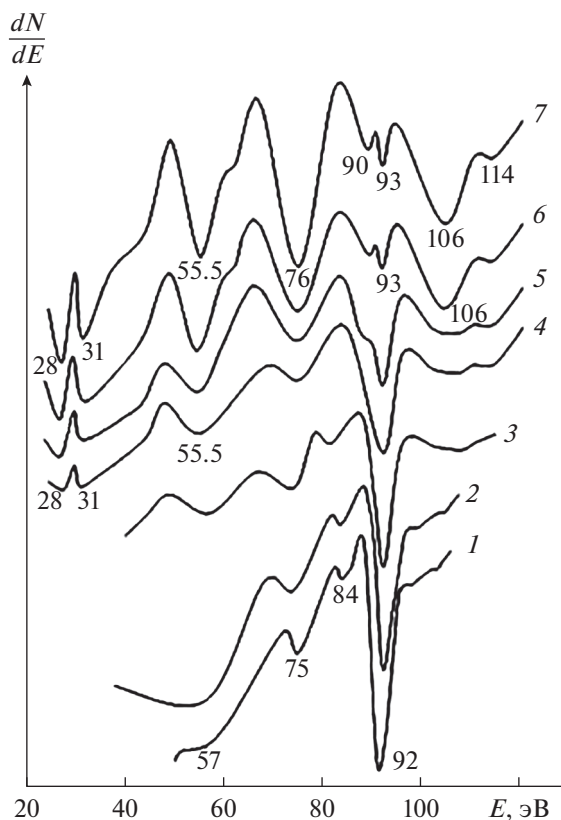
DOI: 10.31857/S1028096020100155

### ВВЕДЕНИЕ

Повышенный интерес к получению тонких пленок силицидов металлов на поверхности Si и исследованию электронной и кристаллической структуры обусловлен перспективой их использования в качестве материала низкоомных контактов [1], термоэлектрических материалов [2, 3],  $p$ – $n$ -переходов, элементов кремниевых интегральных схем и эффективных геттеров [3, 4]. Сведения о способах получения и свойствах массивных силицидов различных элементов содержатся в [5]. В последние годы в качестве перспективных материалов чаще всего упоминают силицидные пленочные материалы ( $CoSi_2$ ,  $CrSi$ ,  $FeSi_2$ ,  $NiSi_2$  и другие), что обусловлено возможностью их практического использования в качестве геттероструктурных, термоэлектрических и других приборных элементов [6]. О поведении в кремнии и германии щелочных элементов тяжелее лития впервые сообщалось в [7]. Авторы отмечают, что все они характеризуются медленной диффузией и не создают электронных уровней вблизи границ запре-

щенной зоны. В случае германия хорошо изученным щелочным элементом является только литий, который ведет себя как подвижный мелкий донор. Благодаря этому свойству он нашел применение в производстве германиевых детекторов ядерных излучений. В [8] впервые получены доказательства проявления донорных свойств ионов натрия, имплантированных в германий. Установлены дозы и температуры отжига, при которых термозонд регистрирует  $n$ -тип проводимости на поверхности легированного слоя. Ранее [9, 10] исследованы поверхности Si(111) и Si(100), имплантированные ионами Na и Ba. Было обнаружено, что при имплантации в кремний большой дозы ионов Na и Ba с низкой энергией в приповерхностной области формируются тонкие пленки силицида натрия и бария. Отсутствие подобных сведений о поведении других щелочных элементов в Si послужило поводом для проведения настоящей работы.

Целью работы было исследование влияния имплантации различных доз низкоэнергетиче-



**Рис. 1.** Оже-спектр Si(111) при имплантации ионов  $Rb^+$  с  $E_0 = 1$  кэВ, доза облучения  $D$ : 0 (1);  $5 \times 10^{13}$  (2);  $5 \times 10^{14}$  (3);  $5 \times 10^{15}$  (4);  $5 \times 10^{16}$  (5);  $8 \times 10^{16}$  (6);  $2 \times 10^{17}$   $cm^{-2}$  (7).

ских ионов  $Li^+$ ,  $Rb^+$ ,  $K^+$  и  $Cs^+$  на элементный, химический состав и кристаллическую структуру поверхности Si(111) и Si(100), установление оптимальных режимов имплантации и отжига для формирования на поверхности кремния монокристаллической пленки силицида металла.

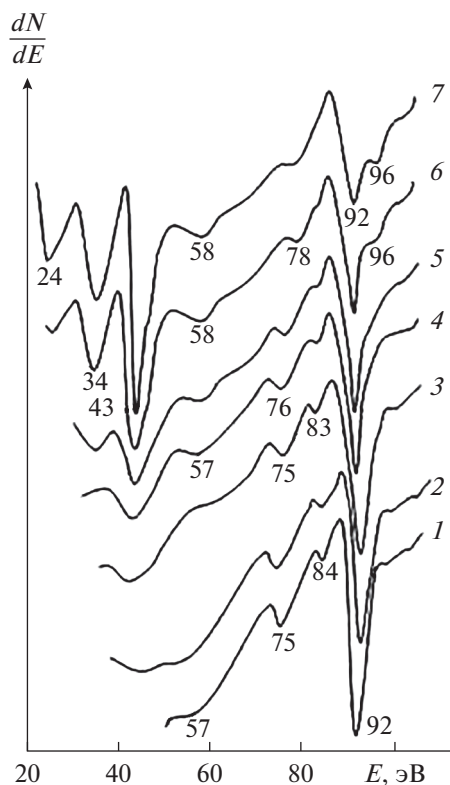
### МЕТОДИКА

В работе исследована электронная и кристаллическая структура тонких наноразмерных пленок силицидов  $MeSi$  ( $Me$ : Na, Rb, Cs, Li). Экспериментальные измерения проводили на приборе с анализатором типа сферического зеркала с тормозящим полем, позволяющим исследовать поверхность методами электронной оже-спектроскопии, спектроскопии упруго рассеянных электронов, фотоэлектронной спектроскопии и дифракции медленных электронов при давлении остаточных газов не более  $10^{-7}$  Па [11]. В качестве объектов исследования были выбраны монокристаллы Si(111), Si(100)  $n$ - и  $p$ -типа с удельным сопротивлением 6  $кОм \cdot см$ . В технологической камере проводили обработку поверхности исследуемых материалов термическим прогревом, электронной бомбардировкой, ионным травлением, а также проводили имплантацию ионов Ba и щелочных элементов с энергией 0.5–5 кэВ дозой от  $10^{13}$  до  $2 \times 10^{17}$   $cm^{-2}$ . Образцы Si очищали путем традиционного отжига в два этапа: длительно при температуре 1200 К в течение 60 мин и кратковременно при 1500 К в течение 1 мин. Также применяли разработанный авторами новый способ очистки поверхности монокристаллов Si, который заключается в предварительной имплантации большой дозы ионов Ba или щелочных элементов с низкой энергией в очищенный традиционным способом кремний и в последующем кратковременном отжиге при 1550 К [11]. В результате внедренные атомы щелочных металлов удаляются из приповерхностной области Si, образуя соединения с атомами Si, C, O, S, и тем самым приводят к дополнительной очистке Si. Морфологию, микроструктуру и химический состав образцов исследовали методами растровой электронной спектроскопии (РЭМ) и рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии с использованием микроскопа Quanta 200 3D при ускоряющем напряжении от 5 до 30 кВ в режимах детектирования вторичных и обратно рассеянных электронов.

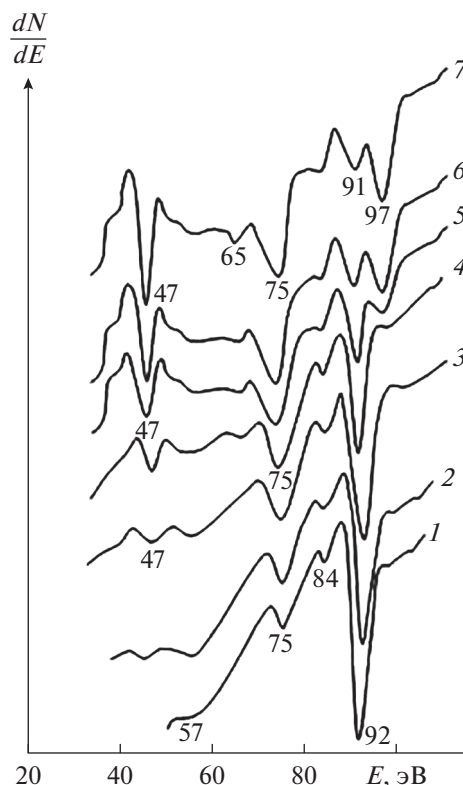
Для установления типа кристаллической структуры поверхности наноразмерных пленок силицидов после проведения кратковременного (в течение 1–2 мин) при соответствующих температурах отжига ионно-имплантированных образцов Si снимали картины дифракции медленных электронов. Изменения элементного и химического состава приповерхностной области Si при имплантации щелочных элементов исследовали методом электронной оже-спектроскопии.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены оже-спектры кремния, имплантированного различной дозой ионов Rb с  $E_0 = 1$  кэВ. Как показывают спектры, при имплантации до дозы  $10^{15}$   $cm^{-2}$  пики, характерные для Rb, практически отсутствуют. Вероятно, это связано с глубоким проникновением ионов  $Rb^+$  при малых дозах облучения вследствие каналирования. Начиная с дозы  $5 \times 10^{15}$   $cm^{-2}$  (кривая 4) в спектре появляются оже-пики, характерные для Rb – при 28, 31, 57, 76, 106 и 114 эВ, также присутствует основной низкоэнергетический пик кремния  $Si_{L_{2,3VV}}$  при 92 эВ. С увеличением дозы ионов  $Rb^+$ , при  $D > 10^{16}$   $cm^{-2}$ , в спектре наблюдается трансформация оже-пика  $Si_{L_{2,3VV}}$  из синглетной формы в дублетную (рис. 1, спектры 5–7). При этом сохраняются оже-пики Rb при 28, 31, 55.5 и 76 эВ.



**Рис. 2.** Оже-спектры чистого Si(111) (1) и Si, имплантированного ионами  $\text{Li}^+$  с  $E_0 = 1$  кэВ при дозе облучения  $D$ :  $5 \times 10^{13}$  (2);  $5 \times 10^{14}$  (3);  $5 \times 10^{15}$  (4);  $10^{16}$  (5);  $10^{17}$  (6);  $5 \times 10^{17}$ ;  $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  и отжиг при 1000 К в течение 1 мин (7).



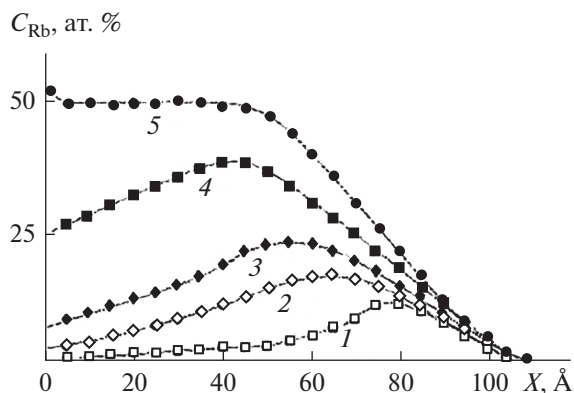
**Рис. 3.** Оже-спектр кремния при имплантации ионов  $\text{Cs}^+$  с  $E_0 = 1$  кэВ, доза облучения  $D$ : 0 (1);  $5 \times 10^{13}$  (2);  $5 \times 10^{14}$  (3);  $5 \times 10^{15}$  (4);  $10^{16}$  (5);  $8 \times 10^{16}$  (6);  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  (7).

Такое изменение формы оже-пика кремния при 92 эВ, вероятно, связано с образованием химического соединения между атомами Rb и Si. Связь осуществляют  $sp^3$ -гибридизированные электроны Si и  $s$ -электроны Rb [5]. Отметим, что подобная картина наблюдалась в [12] при имплантации ионов  $\text{Cr}^+$  и  $\text{N}^+$  в кремний. Авторами получены пленки силицида хрома  $\text{Cr}_2\text{Si}$  и нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Аналогичное раздвоение оже-пика кремния  $\text{Si}_{L_{2,3VV}}$  наблюдалось также при имплантации ионов  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cs}^+$  и  $\text{Ba}^+$ . В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены оже-спектры Si(111), имплантированного ионами  $\text{Li}^+$  и  $\text{Cs}^+$  с энергией  $E_0 = 1$  кэВ при различной дозе облучения.

Согласно [5] в кристаллических структурах силицидов щелочных металлов ( $\text{NaSi}$ ,  $\text{KSi}$ ,  $\text{RbSi}$ ,  $\text{CsSi}$ ) атомы кремния образуют тетраэдрические изолированные группировки с электронной конфигурацией  $sp^3$ , представляющие  $(\text{Si}_4)^4$ -полианионы, окруженные 16 атомами щелочного металла. То есть в данном случае наблюдается сочетание ионной связи (между атомами металлов и атомами кремния) с ковалентной связью между атома-

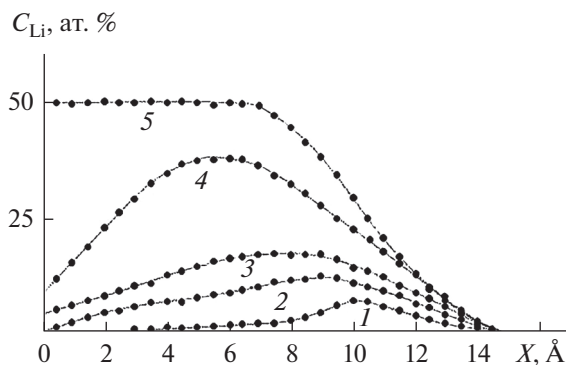
ми Si. Таким образом, трансформация оже-пика  $\text{Si}_{L_{2,3VV}}$  из синглетной формы в дублетную при имплантации больших доз ионов щелочных элементов в Si, вероятно, связана с образованием химического соединения между атомами Si и внедренной примеси. Типы образующихся химических соединений определяли из профилей распределения концентрации атомов в ионно-имплантированном слое кремния по интенсивности низкоэнергетических пиков Si и внедренной примеси. Профили распределения атомов по глубине получали методом количественной электронной оже-спектроскопии при послойном травлении пучком ионов  $\text{Ag}^+$  с энергией 1.5–3 кэВ, падающими под углом  $15^\circ$  к поверхности. Скорость травления составляла  $3\text{--}4 \text{ \AA} \cdot \text{мин}^{-1}$ .

Концентрации имплантированных атомов в кремнии рассчитывали с помощью введения факторов обратной элементной оже-чувствительности с матричными поправками [13]. На рис. 4 приведены концентрационные профили распределения атомов Rb в Si(111), имплантированном ионами с  $E_0 = 1$  кэВ при различных дозах облучения, полученные расчетным способом по отме-



**Рис. 4.** Концентрационные профили распределения атомов Rb, имплантированных в Si(111) с энергией  $E_0 = 1$  кэВ, доза облучения  $D$ :  $5 \times 10^{13}$  (1);  $5 \times 10^{14}$  (2);  $5 \times 10^{15}$  (3);  $8 \times 10^{16}$  (4);  $2 \times 10^{17}$  см $^{-2}$  (5).

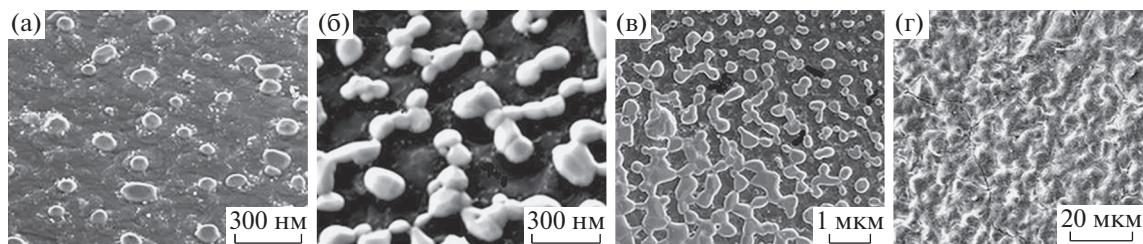
ченной выше методике. Видно, что при дозах имплантации до  $5 \times 10^{15}$  (кривая 3) форма профилей распределения атомов Rb по глубине близка к гауссовской, с увеличением дозы ионов максимум распределения смещается к поверхности. Максимальная глубина проникновения Rb составляет 110 Å. При дозе имплантации  $2 \times 10^{17}$  см $^{-2}$  максимум распределения наблюдается на поверхности. Образуется практически ступенчатый профиль распределения с концентрацией Rb примерно 50 ат. % на глубине 40 Å. Учитывая характер изменения пика  $Si_{L_{2,3VV}}$ , можно предположить, что в этой области образуется моносилцид рубидия RbSi. Другой особенностью экспериментальных профилей является то, что глубина проникновения ионов оказывается несколько больше, чем в случае профилей, полученных компьютерным моделированием. Данное расхождение может быть обусловлено вбиванием атомов Rb ионами  $Ag^+$  при травлении, проявлением эффекта каналирования ионов, особенно в начале ионной имплантации, поскольку диаметр атома рубидия меньше межатомного расстояния в плоскости Si(111). Небольшой хвост в распределении атомов вблизи поверхности образца при больших дозах облучения  $D = 2 \times 10^{17}$  см $^{-2}$ , очевидно, обусловлен избыточными несвязанными атомами Rb, частично осажденными из ионного пучка в процессе имплантации. Аналогичные закономерности наблюдались для концентрационных профилей распределения ионов  $Li^+$  (рис. 5). Из сравнения профилей следует, что ионы Li проникают в Si(111) гораздо глубже, чем другие ионы. Глубина проникновения Li с энергией 1 кэВ при имплантации составляет 150 Å. Это связано с тем, что ковалентный радиус атомов Li наименьший и составляет 1,23 Å, что значительно меньше межатомного расстояния атомов Si на грани (111). Для



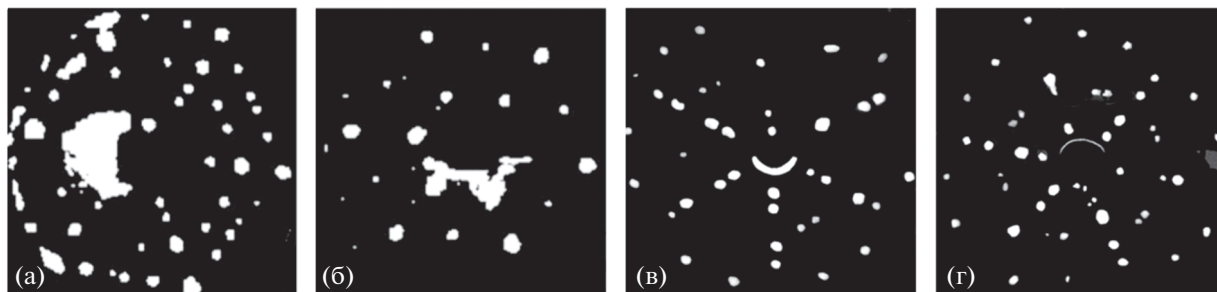
**Рис. 5.** Концентрационные профили распределения атомов Li, имплантированных в Si(111) с энергией  $E_0 = 1$  кэВ, доза облучения  $D$ :  $2 \times 10^{13}$  (1);  $2 \times 10^{14}$  (2);  $2 \times 10^{15}$  (3);  $5 \times 10^{16}$  (4);  $5 \times 10^{17}$  см $^{-2}$  и отжиг при  $T = 1000$  К (5).

доведения концентрации Li в приповерхностной области Si до 50 ат. % после имплантации дозы ионов Li  $5 \times 10^{17}$  см $^{-2}$  необходим отжиг при  $T = 1000$  К в течение 1 мин. За счет диффузии атомов Li к поверхности в приповерхностном слое толщиной 60 Å образуется моносилцид лития. При измерении профилей распределения атомов щелочных элементов в Si(100) было установлено, что глубина проникновения ионов при одинаковых условиях имплантации больше, чем в Si(111). Это, очевидно, связано с тем, что грань (111) кремния наиболее плотно упакованная, а (100) наименее плотная. Экспериментально установлено также, что кратковременный отжиг имплантированных большой дозой ионов образцов Si в течение 2–10 мин при температуре  $T = 700$ – $1000$  К приводит к десорбции несвязанных атомов примеси и к полному соединению оставшихся атомов с атомами Si.

На рис. 6 приведены РЭМ-изображения поверхности, полученные на разных стадиях формирования пленки силицида рубидия. Из рисунка видно, что при имплантации дозы ионов  $Rb^+$   $10^{15}$  см $^{-2}$  (рис. 6а) формируются отдельные мелкие островки силицида рубидия с размерами 10–30 нм. С увеличением дозы до  $10^{16}$  см $^{-2}$  они сливаются в более крупные островки округлой формы размером от 30 до 100 нм (рис. 6б). Наличие огранки свидетельствует об их монокристаллической структуре [14]. Однако между крупными островками наблюдаются неограниченные мелкие островки с аморфной структурой. Дальнейшие увеличения дозы имплантации ионов Rb до  $2 \times 10^{17}$  см $^{-2}$  приводит к росту плотности островков, но их размеры заметно не меняются (рис. 6в). После проведения последующего кратковременного отжига при  $T = 900$  К в течение 1 мин происходит полное слияние островков и формирование



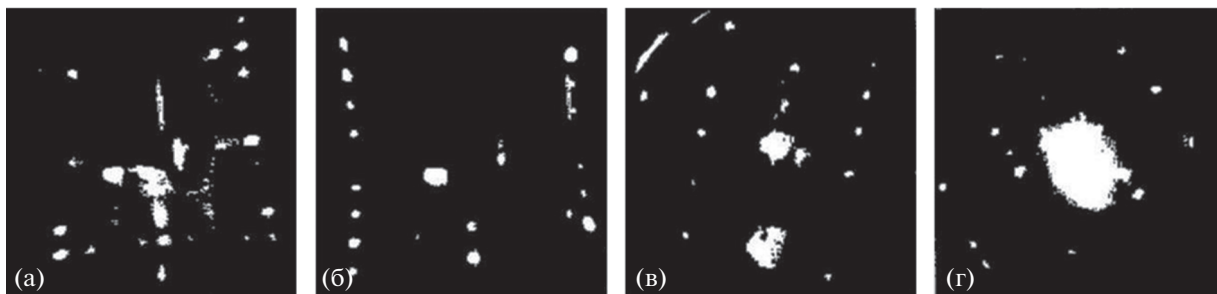
**Рис. 6.** РЭМ-изображения поверхности Si(111), имплантированной ионами  $Rb^+$  с  $E_0 = 1$  кэВ при  $T = 300$  К, доза облучения: а –  $10^{15}$ ; б –  $10^{16}$ ; в –  $2 \times 10^{17}$ ; г –  $2 \times 10^{17}$   $см^{-2}$  и отжиг при  $T = 900$  К в течение 1 мин.



**Рис. 7.** Картины дифракции медленных электронов для поверхности Si(111), имплантированной ионами Li, Rb, K и Cs с  $E_0 = 1$  кэВ, после отжига в течение 1 мин при  $T = 900$  (а), 800 (б, в), 500 К (г), образование сверхструктур: а – Si(111)–(4 × 4)Li; б – Si(111)–(2 × 2)Rb; в – Si(111)–(4 × 4)K; г – Si(111)–(4 × 4)Cs.

сплошной пленки силицида рубидия (рис. 6г). На картине дифракции медленных электронов в пленке силицида рубидия наблюдается сверхструктура Si(111)–(2 × 2)Rb. Аналогичные результаты также наблюдались при имплантации в Si ионов других щелочных элементов [15]. На рис. 7 приведены картины дифракции медленных электронов на поверхности Si(111), имплантированных ионами Li, Rb, K и Cs с энергией 1 кэВ, полученные после кратковременного отжига при различных температурах. На дифракционной картине Si(111)–(4 × 4)Li (рис. 7а) кроме основных рефлексов наблюдаются двойниковые рефлексы – дублеты. Наличие дублетов свидетель-

ствует о доменном характере пленки лития, образованной на кремнии. Двойниковые или дробные рефлексы также наблюдаются на дифракционной картине Si(111)–(4 × 4)K (рис. 4в) и Si(111)–(4 × 4)Cs (рис. 4г). Имеют место три системы дополнительных рефлексов, которые отвечают трем плоскостям, ограничившим появившиеся фасетки. Поскольку с увеличением энергии первичных электронов  $E_p$  дополнительные рефлексы, возникающие из двумерного рефлекса 00, смещались в направлении  $\langle 10 \rangle$ , можно предположить, что гранями фасетки являются плоскости типа (110). При отжиге образцов Si(100), имплантированных ионами  $Li^+$ ,  $Rb^+$ ,  $K^+$  и  $Cs^+$  с  $E_0 = 1$  кэВ, обнаружены следую-



**Рис. 8.** Картины дифракции медленных электронов для поверхности Si(100), имплантированной ионами Li, Rb, K и Cs с  $E_0 = 1$  кэВ, после отжига в течение 1 мин при  $T = 900$  (а), 800 (б, в), 500 К (г), образование сверхструктур: а – Si(100)–(2 × 1)Li; б – Si(100)–(2 × 4)Rb; в – Si(100)–(2 × 1)K; г – Si(100)–(2 × 8)Cs.

**Таблица 1.** Оптимальные режимы формирования тонких наноразмерных пленок силицидов бария и щелочных элементов

Тип силицида	LiSi	KSi	RbSi	CsSi
Параметры				
Структура исходного Si	100 111	100 111	100 111	100 111
Энергия ионов, кэВ	0.5–5	0.5–5	0.5–5	0.5–5
$T$ отжига, К	900–1000	800–850	800–850	500–600
Толщина силицида, Å	50–110	35–95	30–90	40–90
Тип сверхструктуры	$2 \times 1$ $4 \times 4$	$2 \times 1$ $4 \times 4$	$2 \times 4$ $2 \times 2$	$2 \times 8$ $4 \times 4$
Энергия электронов $E_p$ , эВ	42	49	35 42	39 30
$T$ восстановления исходной структуры, К	1400	1200	1200	1000

щие поверхностные сверхструктуры (рис. 8): Si(100)–( $2 \times 1$ )Li, Si(100)–( $2 \times 4$ )Rb, Si(100)–( $2 \times 1$ )K, Si(100)–( $2 \times 8$ )Cs.

В табл. 1 приведены режимы формирования (структура исходного Si, энергия ионов, температура последующего отжига) и типы поверхностных сверхструктур силицидов щелочных элементов, образующихся при отжиге ионно-имплантированных образцов кремния, а также толщина силицидной пленки и температура восстановления исходной структуры кремния. Отметим, что указанные поверхностные сверхструктуры наблюдались и при отжиге образцов, имплантированных ионами с большой энергией ( $E_0 = 2–5$  кэВ). Различие заключалось лишь в том, что для формирования поверхностных структур требовался более длительный (тем больше, чем больше энергия иона) отжиг при соответствующих температурах. В зависимости от вида исходной грани поверхности кремния и типа имплантируемых ионов щелочных элементов образуются поверхностные сверхструктуры различных типов.

Ранее [15] было показано, что в результате имплантации большой дозы ионов щелочных элементов в Si в приповерхностной области преимущественно образуется химическое соединение, состоящее из внедренных атомов и атомов кремния. Последующий кратковременный отжиг приводит к формированию пленок силицидов и десорбции излишних щелочных атомов. Как показали концентрационные профили распределения атомов, измеренные при послыжном травливании поверхности, в приповерхностной области формируются пленки моносилицидов щелочных элементов толщиной от 30 до 110 Å при увеличении энергии ионов от 0.5 до 5 кэВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что имплантация ионов щелочных элементов в Si(111) и Si(100) при больших дозах ( $10^{16}–10^{17}$  см $^{-2}$ ) приводит к частичному образованию силицидов металлов и после кратковременного отжига при соответствующих температурах образуются пленки моносилицидов Li, Na, K, Rb, Cs и Ba. Установлено, что при дозах до  $5 \times 10^{15}$  форма профилей распределения имплантированных атомов по глубине близка к гауссовской, с увеличением дозы ионов максимум распределения смещается к поверхности. При высоких дозах  $\sim 2 \times 10^{17}$  см $^{-2}$  максимум распределения наблюдается непосредственно на поверхности. Образуется практически ступенчатый профиль распределения. В ходе исследований методом РЭМ высокого разрешения установлено, что при имплантации дозы ионов Rb $^+$   $10^{15}$  см $^{-2}$  формируются отдельные мелкие островки силицида рубидия с размерами 10–30 нм. С увеличением дозы имплантации они сливаются в более крупные (размером 30–100 нм) монокристаллические островки округлой формы. Между крупными островками наблюдаются неограниченные мелкие островки с аморфной структурой. При дозе  $6 \times 10^{16}$  см $^{-2}$  и отжиге при  $T = 900$  К происходит полное слияние островков и формирование сплошной пленки силицида рубидия. Определены оптимальные режимы формирования тонких наноразмерных пленок силицидов бария и щелочных элементов. Показано, что толщина пленок силицидов металлов линейно растет с увеличением энергии имплантируемых ионов и при фиксированной энергии увеличивается с ростом дозы как  $D^{1/2}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nolph C.A., Vescovo E., Reinke P.* // Appl. Surf. Sci. 2009. V. 255. P. 7642.
2. *Schmitt A.L., Higgins J.M., Szczech J.R., Jin S.* // J. Mater. Chem. 2009. V. 20. P. 223.
3. *Орехов А.С., Камилов Т.С., Ибрагимова Б.В. и др.* // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. № 6. С. 740.
4. *Мьюрарка Ш.* Силициды для СБИС. М.: Мир, 1986. 176 с.
5. *Самсонов Г.В., Дворина Л.А., Рудь Б.А.* Силициды. М.: Металлургия, 1979. 270 с.
6. *Ivanenko L.I., Shaposhnikov V.L., Filonov A.B. et al.* // Thin Solid Films. 2004. V. 461. P. 141.
7. *Баграев П.Т., Буравлев А.Д., Клячкин Л.Е. и др.* // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. С. 462.
8. *Король В.М., Кудрявцев Ю.* // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 2. С. 268.
9. *Rysbaev A.S., Khujaniyozov J.B., Rakhimov A.M., Bekpulatov I.R.* // Tech. Phys. 2014. V. 59. № 10. P. 1526.
10. *Rysbaev A.S., Khujaniyozov J.B., Normuradov M.T. et al.* // Tech. Phys. 2014. V. 59. № 11. P. 1705.
11. *Рысбаев А.С., Хужаниёзов Ж.Б., Рахимов А.М., Бекпулатов И.Р.* Способ дополнительной очистки поверхности монокристаллов кремния. Патент № IAP 05720. 30.11.2018.
12. *Иваненко Л.И.* Формирование полупроводниковых силицидов методом ионно-лучевого синтеза // Матер. IV междунар. конф. "Взаимодействие излучений с твердым телом". Минск, 2001. С. 22.
13. *Oura K., Lifshits V.G., Saranin A.A. et al.* Surface Science an Introduction. Berlin–Heidelberg: Springer–Verlag, 2006. 490 p.
14. *Уанг Ж.Л., Борисевич А., Джианнуцци А.Л. и др.* Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение. М.: Лаборатория знаний, 2015. 601 с.
15. *Рысбаев А.С., Нормуратов М.Т., Насриддинов С.С., Адамбаев К.А.* // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. № 1. С. 125.

## Structure of *MeSi* Silicide Films (*Me*: Li, Rb, K and Cs) according to Electron Microscopy Data and Diffraction of Slow Electrons

M. T. Normuradov<sup>2</sup>, A. S. Risbaev<sup>1,\*</sup>, J. B. Khujaniyozov<sup>1</sup>, D. A. Normuradov<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Tashkent State Technical University named after I.A. Karimov, Tashkent, 100095 Uzbekistan

<sup>2</sup>Karshi State University, Karshi, 180103 Uzbekistan

\*e-mail: rysbaev@mail.ru

\*\*e-mail: normurodov1989@mail.ru

The formation of thin nanosized films of metal silicides *MeSi* (*Me*: Li, Rb, K and Cs) was studied by electron spectroscopy techniques, scanning electron microscopy, and slow electron diffraction. As a result of high dose ( $10^{17}$  cm<sup>-2</sup>) implantation of low-energy (5 keV) Li, Rb, K and Cs ions into Si(111) and Si(100) single crystals and short-term thermal annealing, single-crystal silicide films LiSi, RbSi, CsSi, KSi were created in the near-surface silicon region. The optimal modes of ion implantation and annealing were determined for the formation of thin single-crystal films of metal silicides. The thickness of silicide films was shown to increase with increasing energy of implanted ions and at a fixed energy to be proportion to the square root of the ion dose.

**Keywords:** silicon single crystals, implantation with high doses of low-energy ions, concentration profiles of atom distribution, thermal annealing, formation of alkali metal films, structure and composition of nanoscale films.